

ЭППТ 2018



ACED 2018

УДК 62-83

## ЭЛЕКТРОПРИВОД КРАНОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С ФУНКЦИЕЙ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАСКАЧИВАНИЯ ГРУЗА

## ELECTRIC DRIVE OF CRANE MECHANISMS WITH THE ANTI-SWAY FUNCTION

**Ишматов Закир Шарифович**, канд. техн. наук, доцент Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: z.sh.ishmatov@urfu.ru, Тел.: +7(343)3754646

**Бахматов Сергей Александрович**, магистрант Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: 94bahmatov@gmail.com.

**Zakir Sh. Ishmatov**, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: z.sh.ishmatov@urfu.ru, Ph.: +7(343)3754646

**Sergey A. Bakhmatov**, Master's student, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Russia, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: 94bahmatov@gmail.com.

**Аннотация:** В работе выполнен анализ способов устранения раскачивания груза мостового крана при движении тележки или моста. Решение данной проблемы актуально, так как большая часть предложенных на рынке способов сложны в реализации из-за технических особенностей или сложной математической основы. Рассмотренные способы, основанные на формировании определенного закона изменения ускорения тележки или моста во времени, достаточно просты и практически не требуют дополнительных капиталовложений. Реализация данных способов позволяет значительно упростить работу операторов кранов, увеличить производительность технологического процесса и повысить его безопасность.

**Abstract:** In work the analysis of ways of elimination of rocking of cargo of a bridge crane at movement of a carriage or the bridge is executed. The solution to this problem is relevant, since most of the methods proposed in the market are difficult to implement because of technical features or a complex mathematical basis. The considered methods, based on the formation of a definite law for changing the acceleration of a cart or bridge in time, are simple and practically do not require additional capital investments. The implementation of these methods makes it possible to significantly simplify the operation of crane operators, increase the productivity of the technological process and increase its safety.

**Ключевые слова:** электропривод; кран; горизонтальное перемещение груза; устранение раскачивания.

**Key words:** the electric drive; crane; horizontal movement of cargo; anti-sway.

### ВВЕДЕНИЕ

При приложении к механизму передвижения крана постоянной силы возникают колебания подвешенного на канате груза, амплитуда которых пропорциональна ускорению механизма и длине подвеса каната. При увеличении ускорения и длины подвеса отклонение груза достигает больших значений. Для уменьшения амплитуды колебаний груза ускорение механизма должно быть ограничено, что приводит к увеличению времени переходных процессов и снижению производительности работы кранов. Наличие остаточных колебаний груза в конце переходного процесса осложняет процесс управления краном и затрудняет точную установку грузов.

Ручной способ успокоения колебаний груза заключается в том, что крановщик определенным образом маневрирует механизмами крана. Крановщики подавляют колебания груза, управляя приводным механизмом следующим образом: при разгоне осуществляют операции «пуск – торможение – пуск», а при торможении «торможение – пуск – торможение» [1]. Для такого управления краном требуется достаточно большая практика, либо специальное обучение крановщиков. Помимо этого, такой метод управления краном быстро утомляет рабочий персонал, что снижает производительность. Однако стоит отметить, что существенная часть способов автоматического подавления колебаний грузов, строится на таком же принципе управления. Не случайно поэтому алгоритмы

автоматического управления электроприводами горизонтального перемещения наиболее просто и эффективно реализовываются на основе нечеткой логики. Так, способы, описанные в [4 - 6] используют для демпфирования колебаний груза системы управления с фаззи-регуляторами. Данный подход, как отмечено в [8], считается достаточно сложным в реализации. В [4,6] фаззи-регулятор работает на протяжении всего движения тележки, и подавляет колебания, вызванные возмущающими воздействиями, но значительно замедляет процесс перемещения груза.

В [7] предложено ввести в конструкцию крана дополнительный электропривод, который обеспечивает колебания точки подвеса груза для демпфирования колебаний груза. Такой метод значительно усложняет и удорожает конструкцию крана.

Существует множество способов, основанных на построении замкнутых систем автоматического управления, которые требуют измерения угла отклонения груза или его положения. В [10,11] описываются системы, где для определения положения груза используют датчики изображения. Используя информацию о положении груза, система автоматического управления корректирует задание на привод с учетом успокоения колебаний, вызванных движением крана или внешними возмущающими воздействиями. Также разрабатываются комбинированные системы, где используется информация как о положении груза, так и об угле отклонения подвешенного каната [9]. Для получения информации об угле отклонения используются лазерные датчики. Такая система показывает очень хорошие результаты в успокоении раскачивания груза и точности позиционирования, но, как отмечено в [8,9], она сложна в реализации и требует больших затрат при внедрении. Помимо этого рабочая область кранов обычно загрязнена, что снижает точность работы датчиков, либо вовсе не позволяет их применять.

В источниках [1,8] рассматриваются методы, при которых используются такие способы управления переходными процессами пуска или торможения, с помощью которых можно обеспечить завершение этих процессов при вертикальном положении каната и нулевой скорости отклонения груза. Эти способы строятся на формировании определенным образом тахограммы пуска или торможения с учетом колебаний груза. В [8] рассматривается вариант демпфирования колебаний во время разгона до заданной скорости тележки или моста с учетом одновременной работы привода подъема. Такой способ увеличивает

технологического процесса, но усложняет законы формирования переходных процессов из-за изменения длины подвеса. Зачастую одновременная работа привода подъема и привода движения не требуется, хотя такой метод более универсален в сравнении с методами формирования переходных процессов при постоянстве длины каната.

## АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ РАСКАЧИВАНИЯ ГРУЗА

Рассмотрим более подробно наиболее простые способы автоматического успокоения колебаний груза [1], осуществляемые путем формирования определенного закона изменения ускорения тележки от времени, полагая, что справедливы следующие допущения:

- 1) начальные условия для отклонения и скорости отклонения груза нулевые;
- 2) длина подвеса каната в течение переходных процессов остается неизменной;
- 3) возмущающие воздействия на груз отсутствуют.

Рассматриваемые способы имеют следующие особенности:

- после окончания переходного процесса пуска или торможения ускорение механизма  $a_m(t) = 0$ , поэтому в установившемся режиме скорость механизма остается постоянной;
- в конце переходного процесса отклонение и скорость отклонения груза равны нулю, тогда непосредственно после окончания переходного процесса (т.е. в установившемся режиме) отклонение груза будет оставаться нулевым;
- за время переходных процессов скорость механизма достигает требуемого установившегося значения.

Расчетная схема механизмов перемещения крана представлена на рис. 1.

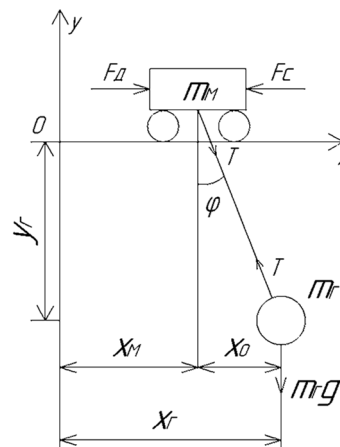


Рис 1. Расчетная схема механизмов перемещения

Здесь  $m_m$  – масса механизма (тележки или крана),  $m_r$  – масса груза,  $l$  – расстояние от точки подвеса до центра масс груза. При перемещении крана или тележки происходит раскачивание груза, который вместе с канатом и механизмом образует маятник с подвижной точкой подвеса. Движение груза осуществляется под действием сил веса груза  $m_r g$  и натяжения каната  $T$ , а движение механизма – под действием приведенной силы  $F_d$ , создаваемой моментом электропривода, силы сопротивления движению  $F_c$  и натяжения  $T$ .

Уравнение движения груза по осям  $x$  и  $y$  имеют вид соответственно:

$$\begin{aligned} -T \sin \varphi &= m_r \frac{d^2 x_r}{dt^2}; \\ T \cos \varphi - m_r g &= m_r \frac{d^2 y_r}{dt^2} \end{aligned}$$

где  $\varphi$  – угол отклонения подвески груза от вертикали;  $x_r$  и  $y_r$  – координаты груза по осям  $x$  и  $y$  соответственно. После преобразований уравнение движения груза запишется в виде:

$$\frac{d^2 x_m}{dt^2} \cos \varphi + l \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + g \sin \varphi = 0 \quad (1)$$

Уравнение движения механизма согласно рис. 1 имеет вид:

$$F_d - F_c + T \sin \varphi = m_m \frac{d^2 x_m}{dt^2}$$

или

$$\begin{aligned} (m_m + m_r \sin^2 \varphi) \frac{d^2 x_m}{dt^2} - m_r g \sin \varphi \cos \varphi - \\ - m_r l \sin \varphi \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 = F_d - F_c \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) нелинейны. Учитывая, что для реальных кранов  $\varphi < 5 \dots 10$  градусов, можно принять  $\sin \varphi = \varphi$ ,  $\cos \varphi = 1$ . Тогда линеаризованные уравнения движения груза и механизма примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x_0}{dt^2} + \omega_r^2 x_0 &= -a_m; \\ \frac{F_d - F_c}{m_m} + \frac{m_r}{m_m} \omega_r^2 x_0 &= a_m, \end{aligned} \quad (3)$$

где:  $x_0 = \varphi l$  – отклонение груза от положения равновесия по оси  $x$ ;  $a_m = \frac{d^2 x_m}{dt^2} = \frac{dv_m}{dt}$  – ускорение механизма;  $v_m$  – скорость механизма;  $\omega_r$  – угловая частота собственных колебаний груза, равная

$$\omega_r = \sqrt{g/l}.$$

Частота собственных колебаний груза может быть определена по формуле

$$f_r = \omega_r / 2\pi \approx 0,5 / \sqrt{l},$$

где длина подвеса каната  $l$  выражена в метрах.

Если перемещение крана или тележки осуществляется электроприводом с замкнутой системой регулирования скорости, такой, что во всех режимах работы регулятор скорости не выходит на ограничение, то второе уравнение в (3) упрощается, поскольку в этом случае усилие, развиваемое двигателем  $F_d$ , компенсирует силу сопротивления движению  $F_c$  и усилия от колебаний груза (вторая составляющая в правой части второго уравнения (3)) таким образом, что ускорение механизма  $a_m$  поддерживается на заданном уровне. Тогда второе уравнение в (3) можно записать:

$$F_r / m_m = a_m,$$

где  $F_r$  – приложенная к тележке (крану) результирующая сила, обеспечивающая ускорение  $a_m$ . Таким образом, упрощенная модель гибкого подвеса груза на кране выглядит так:

$$\frac{d^2 x_0}{dt^2} + \omega_r^2 x_0 = -a_m = -\frac{F_r}{m_m}. \quad (4)$$

Анализ способов успокоения груза выполнен для электропривода тележки мостового крана со следующими техническими данными.

Максимальная масса груза – 12 500 кг  
Расстояние от точки подвеса до центра масс груза  $l = 10 \dots 30$  м (предполагается, что центр масс груза находится в середине груза)  
Максимальная скорость тележки – 0,16 м/с  
Максимальное ускорение тележки – 0,15 м/с<sup>2</sup>  
Масса моста – до 96 000 кг  
Масса тележки – 25 000 кг

Рассмотрим сначала процессы при разгоне до номинальной (максимальной) скорости с паспортным ускорением. Найдем частоту собственных колебаний груза и период колебаний при различной длине подвеса  $l$ . Результаты расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

$l, \text{ м}$	10	15	20	25	30
$\omega_r, \text{ рад/с}$	0,99	0,81	0,70	0,63	0,57
$T_r, \text{ с}$	6,34	7,77	8,97	10,03	10,98

На рис. 2,3 приведены результаты моделирования колебаний груза при работе привода перемещения тележки с максимальным ускорением при различной длине подвеса груза  $l$ . При моделировании учтено естественное демпфирование колебаний за счет сил трения. На рисунках приняты обозначения:  $v_m$  – линейная скорость механизма перемещения, м/с;  $a_m$  – ускорение механизма, м/с<sup>2</sup>;  $x_0$  – отклонение груза от вертикали, м.

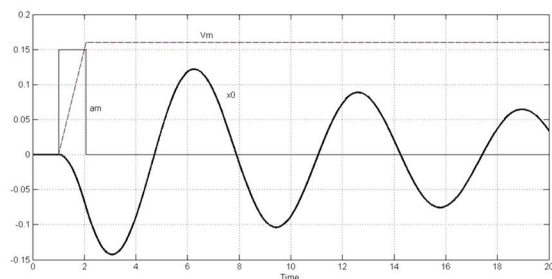


Рис.2. Перемещение тележки при  $l = 10$  м

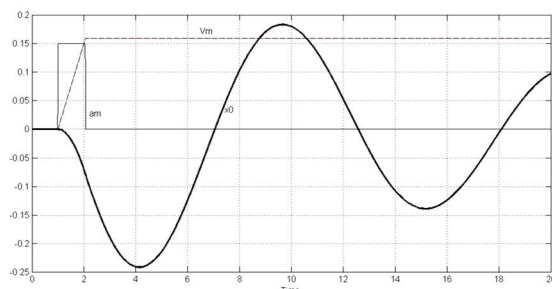


Рис.3. Перемещение тележки при  $l = 30$  м

**Первый способ** [1] заключается в поддержании постоянного ускорения  $a_0$  в течение промежутка времени, равного периоду собственных колебаний

$$T_\Gamma = 2\pi/\omega_\Gamma = 2\pi\sqrt{l/g}. \quad (5)$$

В момент времени  $t = T_\Gamma$ , соответствующий окончанию переходного процесса, отклонение  $x_0$  и скорость отклонения равны нулю. Необходимое ускорение определяется выражением:

$$a_0 = [v_{м.уст} - v_m(0)]/T_\Gamma. \quad (6)$$

Недостатком этого способа является сравнительно большое время переходного процесса, равное  $T_\Gamma$  (см. табл. 1). На рис. 4 приведены результаты моделирования с учетом того, что ошибка в определении длины подвеса может составлять  $\pm 10\%$ .

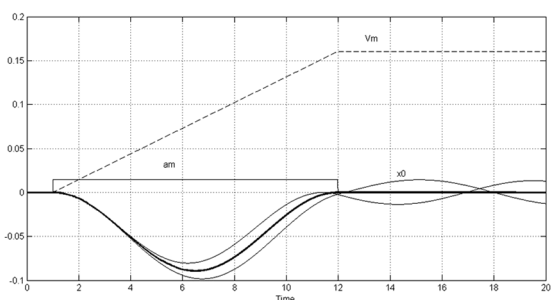


Рис.4. Перемещение тележки при  $l = 30$  м

При **втором способе** [1] задают закон изменения ускорения на трех временных интервалах, на первом и третьем из которых поддерживается одинаковое постоянное ускорение, на втором интервале ускорение равно нулю, продолжительности первого и третьего интервалов также одинаковы (поэтому на каждом из них изменение скорости равно полуразности между конечной и установившейся скоростями),

причем общая длительность первых двух интервалов составляет половину периода  $T_\Gamma$ :

$$t_1 + t_2 = T_\Gamma/2. \quad (7)$$

Продолжительность первого и третьего интервалов

$$t_1 = t_3 = [v_{м.уст} - v_m(0)]/2a_0, \quad (8)$$

где  $a_0$  – максимально допустимое ускорение.

Продолжительность второго интервала

$$t_2 = T_\Gamma/2 - t_1. \quad (9)$$

Общее время переходного процесса (разгона до установившейся скорости)

$$t_{II} = [v_{м.уст} - v_m(0)]/2a_0 + T_\Gamma/2. \quad (10)$$

Из этого выражения можно найти требуемое ускорение, если лимитировано время разгона. Недостатком второго способа также является сравнительно большое время переходного процесса, хотя оно и меньше, чем первого способа. На рис. 5 приведены результаты моделирования для этого способа.

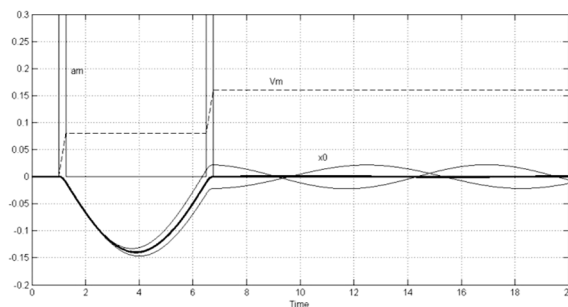


Рис.5. Перемещение тележки при  $l = 30$  м

При **третьем способе** [1] в течение заданного времени  $T_0$  формируют закон изменения ускорения тележки в виде следующей непрерывной функции

$$a_m(t) = a_0[1 + (\omega_0^2/\omega_\Gamma^2 - 1)\cos\omega_0 t], \quad (11)$$

где  $a_0 = [v_{м.уст} - v_m(0)]/T_0$  – среднее ускорение тележки;  $\omega_0 = 2\pi/T_0$  – соответствующая заданному значению  $T_0$  угловая частота. Очевидно, что при  $\omega_0 = \omega_\Gamma$  (или  $T_0 = T_\Gamma$ )  $a_m(t) = a_0$  получаем, как частный случай, первый способ. Однако при отклонении  $T_0$  от  $T_\Gamma$  в ту или другую сторону появляются пики ускорения (и, соответственно, момента двигателя). Чтобы ускорения не превышали максимально допустимых значений  $a_{max}$ , из (11) найдем максимальное значение ускорения  $a_m(t)$ , которое имеет место в начале ( $t = 0$ ) и конце ( $t = T_0$ ) переходного процесса при  $T_0 < T_\Gamma$ :

$$a_{max} = a_0 \omega_0^2/\omega_\Gamma^2 = a_0 T_\Gamma^2/T_0^2. \quad (12)$$

Среднее ускорение, необходимое для разгона до  $v_{м.уст}$  за время  $T_0$

$$a_0 = [v_{м.уст} - v_m(0)]/T_0. \quad (13)$$

Подставив  $a_0$  из (13) в (12), получим:

$$a_{\max} = [v_{\text{м.уст}} - v_{\text{м}}(0)]T_{\Gamma}^2 / T_0^3,$$

откуда при заданном значении максимального ускорения  $a_{\max}$  можно получить:

$$T_0 = \sqrt[3]{[v_{\text{м.уст}} - v_{\text{м}}(0)]T_{\Gamma}^2 / a_{\max}}. \quad (14)$$

На рис. 6 приведены результаты моделирования для этого способа в предположении, что максимально допустимое ускорение равно двукратному паспортному значению, то есть  $a_{\max} = 0,3 \text{ м/с}^2$ .

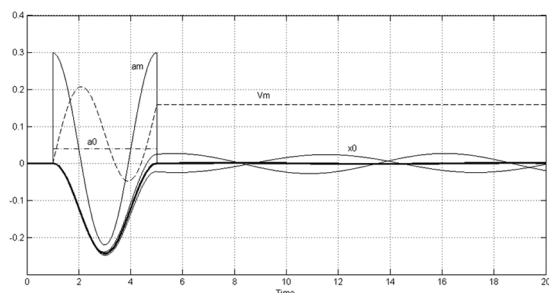


Рис.6. Перемещение тележки при  $l = 30 \text{ м}$

Таким образом, на основе анализа рис. 4-6 можно сделать вывод о том, что третий способ позволяет существенно сократить время разгона и торможения по сравнению с первыми двумя и максимально соответствует действиям опытного крановщика. Этот способ был опробован на кран-балке и показал хорошие результаты. Следует, однако, отметить, что для эффективного подавления колебаний необходимо достаточно точно измерять длину подвеса: уже при 10-процентной погрешности наблюдаются остаточные колебания. При наличии импульсного датчика скорости на электроприводе подъема длина каната достаточно просто и точно измеряется, погрешность могут вносить геометрические размеры груза из-за разного расположения центра масс относительно точки подвеса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показали высокую эффективность достаточно простых способов устранения колебаний груза. Для практического внедрения можно рекомендовать третий способ формирования тахограммы электроприводов горизонтального перемещения кранов, основанный на использовании соотношений (11)-(14). Однако рассмотренные способы не обеспечивают демпфирование колебаний,

вызванных возмущающими воздействиями (порывы ветра, удары о препятствия и т.д.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Масандилов Л.Б. Электропривод подъемных кранов / Масандилов Л.Б. М.: МЭИ. 1998. – 100с.
2. Будиков Л.Я. Многопараметрический анализ динамики грузоподъемных кранов мостового типа / Будиков Л.Я. Луганск. 2003. – 211с.
3. Лобов Н.А. Динамика грузоподъемных кранов / Лобов Н.А. М.: Машиностроение. 1987. – 158с.
4. Щедринов А.В., Коврыжкин А.А. Исследование работы систем ограничения перекоса моста и систем демпфирования колебаний груза мостового крана / Электротехнические комплексы и системы управления. 2010, № 3. С.53-55.
5. Шведова О.А. и др. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / Шведова О.А., Шмарловский А.С., Марков А.В., Тарасевич Т.В. // Минск: Доклады БГУИР. 2014. №1. С.65-71.
6. Коврыжкин А.А. Система управления мостовым краном, построенная с учетом систем демпфирования колебаний груза и ограничения перекоса моста / Автореферат дисс. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2011. 16 с.
7. Лещев В.А. Электропривод для демпфирования колебаний кранового груза / М.: ОНМА. 2013. С.40-48.
8. Панкратов А.И., Залятов А.Ф. Оптимизация переходных процессов движения механизмов перемещения кранов / Наукові праці ДонНТУ. 2008, №16. С.216-221.
9. A Multi-Operational-Mode Anti-Sway and Positioning Control for an Industrial Bridge Crane/K. Sorensen, H. Fisch, S. Dickerson, W. Singhose, U. Glauser// Proceedings of the 17<sup>th</sup> World Congress The International Federation of Automatic Control. Seoul, Korea, July, 2008. P.881-888.
10. A controller enabling precise positioning and sway reduction in bridge and gantry cranes / K. L. Sorensen, W. Singhose, S. Dickerson // Control Engineering Practice. 2007. №15. P.825-837.
11. Anti-sway system with image sensor for container cranes / H. Kawai, Y. B. Kim, Y. W. Choi // Mechanical Science and Technology. 2009. №23. P.2757-2765.